

Application of 3D seismic exploration technology in oil and gas resource detection in complex tectonic areas

Yang Zhang Xiaojie Jia Kunlin Xiao Xiaolu Yan Kun Chen

China Metallurgical Geological Bureau Geophysical Exploration Institute, Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract

With the global surge in energy demand and the gradual depletion of traditional oil and gas resources, the exploration of hydrocarbon resources in complex structural zones has become a critical research focus. Three-dimensional seismic exploration technology, leveraging the unique ability of seismic waves to propagate through diverse geological media, effectively identifies the location, morphology, scale, and other geological features of hydrocarbon reservoirs. This paper, drawing on relevant literature and practical experience, first examines the characteristics of hydrocarbon resources in complex structural zones, then delves into the key application aspects of three-dimensional seismic exploration technology, providing valuable insights for reference.

Keywords

3D seismic exploration technology; complex structure area; oil and gas resources; detection; application

三维地震勘探技术在复杂构造区油气资源探测中的应用

张扬 贾小杰 肖坤林 闫晓录 陈琨

中国冶金地质总局地球物理勘查院, 中国·河北 保定 071000

摘要

随着全球对能源需求的增长以及传统油气资源逐渐枯竭, 复杂构造区油气资源探测逐渐成为了一项重要研究课题。三维地震勘探技术凭借着地震波能够在地下不同介质中传播的优点在油气资源探测中可以较好地探明油气储集体的位置、形态、规模及其他地质特征。有鉴于此, 文章将结合相关文献研究及工作实践, 首先就复杂构造区油气资源特点展开论述, 随后重点对三维地震勘探技术在其具体应用要点进行探讨, 以供参考。

关键词

三维地震勘探技术; 复杂构造区; 油气资源; 探测; 应用

1 引言

随着油气资源勘探深度的增加和勘探地区的复杂性增加, 传统的地震勘探技术面临着一些挑战, 广大企业及科技人员正在不断探索和开发新的地震勘探技术, 以提高勘探的准确性和效率, 为油气资源的勘查开发提供更多的支持^[1]。对此, 下文针对三维地震勘探技术在复杂构造区油气资源探测中的应用展开研究, 具体报道如下:

2 复杂构造区油气资源特点

在中国, 复杂构造区的油气资源主要分布于前陆冲断带、高陡山地、碳酸盐岩区域以及深层—超深层盆地等地质背景中。以塔里木盆地、准噶尔盆地、华北盆地山前带, 以及南方碳酸盐岩区为代表, 这些区域普遍具有断层系统发育、构造复合、沉积环境剧变的特点。以塔里木盆地为例,

其超深层油气存在于寒武系、二叠系—三叠系等多层系, 并且成藏组合复杂: 盆地经历多个构造旋回, 烃源岩生成、生烃历史反映伸展—挤压交替, 形成了纵横断裂控制的成藏体系。碳酸盐岩区则常见岩溶发育和断控岩溶储层, 如塔北隆起英买2井区储层呈断裂主控、小型洞穴—裂隙系统, 裂隙与溶洞分布受断裂系统强烈控制。此外, 中国西部山地(如米仓—大巴山前带)等区域属“双复杂”背景: 地表高陡、地形破碎, 地下多逆冲推覆构造、断层叠加, 这些特征令传统二维地震难以解析其地下构造。因此, 这些复杂构造区既存在高风险勘探, 也蕴藏着巨大油气潜力。探测难点主要体现在信噪比低、侧面干扰波强、近地表多干扰、构造成像困难、储层非均质性强等方面。这些地质特点对地震勘探提出了极高要求, 需要通过优化采集设计、改进处理成像算法, 以及综合解释技术来突破传统探测瓶颈。

【作者简介】张扬(1990—), 男, 中国河北保定人, 本科, 工程师, 从事地球物理勘探研究。

3 三维地震勘探技术在复杂构造区油气资源探测中的应用要点

3.1 宽频、高密度、多方向采集设计

在复杂构造区实施宽频、高密度、多方向三维采集时，应坚持系统化采集设计与现场可实施性相结合：首先，宽频震源与接收带宽协同优化，采用低频延伸至 2-4Hz 并兼顾高频至 80-120Hz 的带宽策略，选配可调阻尼源并进行定量震源谱设计与场地耦合控制以维护相位线性与群时一致性，野外通过实时频谱诊断、源力矩修正与多级去噪保障频谱完整性并为波形反演保留低频信息。其次，高密度采集与近场覆盖强化，依据目标层深度与破碎带尺度精算接收线距（常采取 5-15m 范围）、道间距与叠覆盖目标（折叠度常规指标 ≥ 60 ），通过重叠网格、交叉线网及移动接收阵列提升空间采样分辨力，并配合浅层速度剖面及静校参量采集以降低静校误差与提升近场走时约束，采集时注重动态范围管理与近偏移保留以便实现精细反射界面约束。第三，多方向与多偏移角度布置以约束各向异性响应与断层几何，实施宽方位、交叉与斜向采线构型以均衡方位分布并优化角度—偏移采样，采集期间开展角度域及方位域统计分析、道密度与覆盖因子实时 QC，同时保留近偏移及长偏移信息以支撑 AVO/AVA 与各向异性解释。最后，现场强调可重复性与可量化的 QC 程序，包括覆盖因子、折叠均匀性、方位角分布、偏移角-道数矩阵与道密度剖面等指标的阈值设定，并通过野外小规模试采与样带分析验证设计参数，依据试采结果对线网间距、震源能量与采样率进行动态调整，从而在复杂构造约束下实现高信噪比与高保真度数据并记录野外环境参数以便数据归一化^[2]。

3.2 信号处理与干扰抑制

针对复杂构造区油气资源探测中三维地震勘探技术应用时提升信号-噪声比 (S/N) 并抑制非目标干扰，可采取以下措施：首先，针对随机噪声与轨迹不连续性，采用三维曲波域稀疏表示结合多尺度阈值化处理，以曲波系数的方向—尺度耦合特征区分有效反射与随机噪声，先在局部窗内估计信号相关性矩阵并实施自适应阈值，再行逆变换恢复信号，从而在最大限度保留反射边缘与相位信息的同时提升信噪比；该工序在实际资料中对弱振幅事件的保护尤为有效。其次，针对表面多次与自由面多次，结合三维 SRME 类预测与稀疏反演策略先构建较高保真度的多次预测场，继而在道域实施残差匹配相减，必要时采用波动方程偏移域吻合以校正预测误差，整个流程以保证多次能量在保留走时一致性的前提下被最大抑制，且在数据不完整区域引入稀疏先验以增强稳健性。第三，对面波与地表噪声采用综合剥离与降维化处理：先以频—波数或 tau-p 域分离面波能谱并通过时频滤波与多参数回归剔除主能量，随后在道域实施波形匹配与自适应减法以抑制剩余旁瓣，最终在深度层面通过数据约束的波场延拓/数据回填修正因剥离引入的幅度失真。此外，

实施侧面波和多次反射的预测与抑制。依据高精度速度模型，通过偏移前射线追踪或波动方程仿真预估侧面波路径与强度，同时构建多次反射预测算子，对重叠多次反射贡献施加抑制；结合子集偏移、中性点匹配或降倍采样技术，有效消除边缘多次和缠绕叠加^[3]。与此同时，构建面向复杂构造的宽带偏移前去噪与速度建模方案。先以分偏移距层析反演和多方位网格层析构建高分辨率速度场，以校正波场倾角偏移；接着结合宽带去噪滤波（如 Q 补偿+高频滤波）与叠前深度偏移，用梯度约束全方位偏移提取传播角度信息，并据此校正斜入射波及低振幅反射。最后，为抑制仪器噪声与系统性干扰，构建面向三维采集几何的表面一致性去卷积和频谱修正流程，结合道间相关性校验剔除孤立异常道并实施统计化噪声门限判据，同时引入混合范数约束的迭代重构以兼顾边界保真与平滑性，从而在预叠处理阶段为深度偏移与属性分析提供高质量输入。

3.3 高精度深度偏移与三维成像

三维地震勘探技术应用上，为实现高精度深度偏移与三维成像应采取以下举措：首先，预处理与速度模型构建：在复杂构造区实施高精度深度偏移前，应先行开展多尺度振幅谱分析与频带分离以提升低频能量并抑制多次波干扰，随后将层状速度、断层几何与速度各向异性约束并入反演体系，通过弹性反演与波动方程反演交替迭代构建三维非线性速度场，并以多事件拾取与共偏移走时残差最小化指导模型更新以保证界面与断层走向的几何一致性。其次，预叠深度偏移实施策略：采用时域或频域波动方程预叠深度偏移，针对断层集中区施行局部网格加密与自适应吸收边界处理以减少侧向能量泄散，并在偏移前实施多次剔除与极低频增强，分区执行各向异性走时校正与高阶移相运算，最终输出相位与振幅保真的深度剖面供解释使用。第三，断层成像与薄层分辨增强：将偏移域属性反演与偏移后谱分析耦合，运用偏移域 AVO/AVA 约束薄层弹性参数变化，辅以局部相位校正和多尺度去噪以提升薄层信噪比，对复杂断层交错体实施多尺度融合剖面以精确刻画断层端点、断距与裂缝延展的深度几何特征。最后，质量控制与解释一体化：构建偏移—解释闭环的多参数质量控制体系，使用残差走时分布、偏移能量谱与几何连续性统计量进行单次、道集与体数据的逐级校验，并将偏移不确定性以层序概率体的形式传递至解释环节以实现定量解释与成像结果的一体化；通过偏移域敏感度分析指导补充采集与重复偏移试验以迭代降低深度位置误差，同时对关键剖面实施独立盲测与反向偏移验证以量化解释置信度。

3.4 三维地震属性分析与解释

从三维地震勘探技术实践出发，关于三维地震属性分析与解释，有以下三个方面的具体做法。首先，在断层识别与空间构造分析方面，中国工程技术人员常采用宽方位三维地震资料，提取方位敏感属性，例如方位相干体、结构曲率

体及其高阶融合属性等,以揭示不同倾向和走向断层。以鄂尔多斯盆地盐池地区为例,就应用宽方位三维地震,通过方位敏感属性精确识别出断层系统,再结合钻井资料对断层期次与构造类型进行校正。其次,在裂缝/各向异性储层预测方面,针对碳酸盐岩中高角度倾斜裂缝,中国团队基于TTI(倾斜对称轴横向各向同性)介质理论,利用P波剩余时差(NMO-azimuth时间差)分析技术计算偏移-方位依赖时间差,并反演出裂缝发育的倾角和方位参数。与此同时,还将这种分析融入局部角度域各向异性偏移处理流程,通过引入四阶旅行时方程估算各向异性参数并精确偏移,提高裂缝预测和成像精度^[4]。第三,在多尺度属性融合与智能断层自动识别层面,应用多属性融合策略(例如相干性、曲率、RGB 频、倾角-方位角等多个属性体融合)以增强微小断层和低序结构的识别能力。同时,近年来引入基于机器学习/深度学习的方法,如使用MultiRes-Unet3D网络对三维数据中的断层进行自动识别,该模型能够处理米级到十米级的小断层,具有更高空间连续性和断层边界准确性。这些方法之间经常通过三维可视化平台进行交叉验证,并结合井震数据开展联合解释,以确保属性体中断层、裂缝等构造特征在空间上的一致性和连续性。

3.5 联合地球物理技术与解释一体化

在复杂构造区,推进地球物理与解释一体化应实施三至四条并行且耦合的技术路径:首先,建立基于物性耦合的多场联合反演体系,将高精度三维地震剖面、重力-磁异常及深部电磁剖面纳入统一目标函数,采用分层最小二乘与贝叶斯后验估计并以井控与岩心物性作硬约束,通过层尺度正则化、共轭梯度求解和多起始点敏感性分析,产出速度-密度-电阻率耦合场和对应不确定度分布,从而为断层定位与覆层关系提供物性证据。其次,实施井震同化与高分辨五维道集量化流程,针对方位角时差、频谱窄化与各向异性效应,构建道集去噪、谱增强、方位角重采样与井一震相关系

数迭代校正链路,以获取满足AVO/AVA、频率分解与裂缝属性反演输入的高保真道集,并以井位敏感性测试验证属性响应稳定性。最后,在深水与超深埋目标推广海底节点/海缆三维采集与无井建模闭环,利用多偏移距、多方位角数据与精细速度模型开展正演校核与反演约束,结合属性归一化与相干性分析检验圈闭与储层连续性^[5]。以上路径以三维构造地质体为解释中轴,解释产物需周期性回灌至处理与成像段以实现速度场、偏移与属性解释的迭代收敛;质量控制方面须引入井一震相关系数、频谱宽度、方位覆盖度及反演残差统计作为阶段性判据,以量化各环节数据质量并作为迭代终止与方案选择依据。

4 结语

综上所述,通过总结中国复杂构造区三维地震勘探技术的实践经验,本文提出了宽频高密度采集、信号处理与抑干扰、深度偏移成像、三维属性分析以及多物理场联合解释这五项关键应用要点。结合中国典型盆区(如塔里木、米仓-大巴山、碳酸盐岩构造区等)的具体做法,这些技术逐步形成可持续推广的方法体系。未来,随着地震设备、数据处理算法和解释技术的持续优化,这些路径将为复杂构造区油气资源探测提供更加可靠的支持。

参考文献

- [1] 常德双,王贵重,温铁民,等.中国前陆冲断带油气地震勘探技术及发展方向[J].石油学报,2024,45(1):276-294.
- [2] 张莉.地震勘探技术在油气资源勘查中的应用与前景[J].西部探矿工程,2024,36(10):172-173.
- [3] 常德双,王贵重,温铁民,等.中国前陆冲断带油气地震勘探技术及发展方向[J].石油学报,2024,45(1):276-294.
- [4] 雷刚,窦兴旺,郭红珊,等.地震勘探方法在南方山地油气勘查中的应用[J].中国科技期刊数据库 工业A,2024(002):000.
- [5] 刘明,薛野,刘田田,等.苏北盆地溱潼凹陷三维地震勘探进展及下一步攻关方向[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):163-172.